

城市化进程中人为活动对地质灾害的诱发机制与 防控体系研究

汤天赐

(华南防灾减灾研究院(深圳)有限公司,广东深圳518052)

摘要:本文以深圳市的地质灾害为研究对象,揭示城市化中人为活动诱发地质灾害的机制并构建防控体系。通过遥感监测、数值模拟及机器学习等方法,明确工程开挖、地下水抽采、填海造地与荷载叠加的四类活动通过改变岩土应力、水文环境等致灾,构建“地质-工程-暴雨”耦合模型,证实人为干扰使灾害风险放大2.6-4.1倍,并建立了准确率93.5%的灾害概率模型。提出“智慧监测-韧性规划-协同治理”体系;划定坡高 $\leq 30\text{m}$ 等安全底线,部署InSAR+北斗监测,应用数字孪生技术;首创“城市地质大脑”平台,动态评估5.4万处风险点。该成果为超大城市提供“解析-预测-防控”范式,为城市地质安全管理提供参考依据。

关键词:人为诱发地质灾害;城市化;防控体系;工程扰动;灾害链模型;智慧防控

中图分类号:P642;X43

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)11-0086-7

0 引言

在全球城市化加速背景下,高强度人为活动已成为地质灾害的核心诱因。深圳作为中国城市化率最高的超大城市,近十年工程活动诱发的地质灾害占比达78%,2015年光明新区滑坡事件更暴露了“人为扰动-灾害链演化”的复杂性。现有研究虽在自然致灾机制领域成果丰硕,但对城市化进程中“工程扰动-地质环境响应-灾害链生成”的动力学耦合机制缺乏系统性解析,且防控体系面临监测碎片化、跨部门协同不足等瓶颈^[1]。

针对上述问题,本研究以深圳为研究和实证对象,聚焦工程开挖、地下水抽采、填海造地与荷载叠加四类典型人为活动,通过多源遥感监测、FLAC3D数值模拟与XGBoost机器学习等方法,首次构建“地质-工程-暴雨”三联致灾模型,定量揭示花岗岩残积土边坡失稳、岩溶塌陷等灾害的临界机制;同步提出“监测-建模-调控”闭环防控框架,集成InSAR实时预警、BIM+GIS风险模拟及灾后数字孪生修复技术,制定并提交了《深圳市工程活动地质安全导则》建议稿^[2]。

该研究成果的创新点包括:(1)突破传统单一模型局限,建立“物理机制驱动-数据智能验证”的混合建模框架;(2)提出“人为扰动强度指数”(HDI),量化城市化与灾害风险的动态关联;(3)研发“城市地质大脑”平台,实现5.4万处风险点的分钟级动态评估。该成果不仅填补超大城市人为灾害链理论空白,更通过深圳实践验证(2024年人为诱发灾害数量下降41%,预警响应效率提升80%),为粤港澳大湾区地质灾害联防联控提供可复制的“机制解析-精准防控”科学范式,对高密度城市地质安全管理具有重要理论与实践价值。

1 深圳人为活动与地质灾害特征深度关联

1.1 地质本底控制下的灾害空间分异

深圳的地质脆弱性源于其独特的构造背景与岩土特性。作为华南沿海断裂带的活动区,全市62%面积为低山丘陵,广泛分布的燕山期花岗岩风化残积土具有高孔隙比(>0.9)和低黏聚力($<20\text{kPa}$),在干湿(高温-蒸发、多雨-含水)循环下易发生崩解。这种本底条件与城市化叠加,



图1 工程扰动型边坡图

导致灾害呈显著空间分异。罗湖-龙岗滑坡高发带集中了全市 68% 的滑坡事件,主要发生在坡度 15° - 35° 的花岗岩残积土区。例如 2018 年盐田某道路切坡工程(坡高 40m)引发滑坡,体积达 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,直接诱因为开挖卸荷导致抗滑力下降 23%(深圳市应急管理局报告);前海-宝安地面沉降区的软土层(最大厚度 20m)因高压缩性(压缩系数 $>0.5 \text{ MPa}^{-1}$),在填海造地与建筑荷载作用下持续固结沉降,2015-2023 年 InSAR 监测显示年均沉降速率 30-50mm;横岗-坪地岩溶塌陷风险区的可溶岩覆盖率达 12.3%,地下水抽采引发的水位波动使塌陷风险提升 4.1 倍(深圳市地质调查院,2023)。地质灾害发生和分布的密度与城市开发强度指数呈强正相关,印证人为活动是灾害激化的核心驱动力^[3]。

1.2 四类人为致灾机制

工程扰动型边坡失稳。以深圳湾超级总部基地为例,如图 1 所示,深 22m 的基坑开挖打破原始应力平衡,坡脚剪应力集中区扩大至原状土的 1.8 倍(FLAC3D 模拟),引发周边坡体位移速率达 5.4 mm/d (北斗监测),最终诱发次级滑坡。其本质是开挖卸荷-应力重分布-抗剪强度衰减的链式过程^[4]。

水文干预型地面变形。在龙华中心区表现为年均 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 地下水开采量导致承压水位下降 8.3m,引发累计沉降 162mm;而岩溶区更具敏感性——横岗某工业园抽水速率达 1.8 m/月 (超临界阈值 1.5 m/月),诱发塌坑直径 15m,根

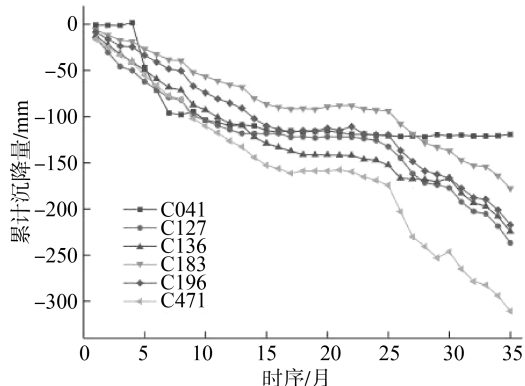


图2 深圳前海填海区典型监测点累计沉降时序曲线

本原因为潜蚀作用导致溶洞顶板承载力丧失^[5]。

地表改造型软土沉降。前海填海区软土在交通动荷载下表现出强流变性,离心试验证实动荷载使次固结系数提高 40%,导致桂湾片区道路在竣工 3 年内反复开裂,最大裂缝宽度达 50mm^[6]。如图 2 所示,据空港新城区域 2019 年 5 月至 2022 年 4 月的 35 期监测数据表明,填海区沉降随时间累积、部分点位后期加速(如 C471 点,20 个月后沉降斜率陡增)。

荷载叠加型地裂缝。福田 CBD 高层建筑群(平均容积率 6.8)产生附加应力 120kPa,超过砂土层天然承载力极限(97kPa) 23%,活化隐伏断裂带并形成 11 条地裂缝(最大延伸 380m)。该类灾害呈现“荷载差异-土体蠕变-裂缝扩展”的渐进破坏特征^[7]。

1.3 灾害链式效应实证

2015 年光明新区红坳渣土场滑坡是工程建设违规、水文突变与土体强度劣化耦合的典型灾害链:

(1)人为堆载超限阶段(2013-2015 年):渣土堆高 100m、超设计限值 67%,基底软土在长期荷载下发生剪切破坏,抗剪强度降至 12kPa(仅为原值 35%);

(2)极端降雨触发阶段(2015 年 12 月):台风“彩虹”带来日降雨量 342mm,渣土饱和容重由 18 kN/m^3 增至 21 kN/m^3 ,孔隙水压力骤升导致有效应力锐减;

(3)链式溃决扩散阶段:FLOW-3D 模拟显

表 1 人为致灾概率模型表

人为活动类型	灾害概率增幅	主导因子及权重	防控阈值建议
切坡工程(>25°)	3.8 倍	坡高×坡度($\beta=0.62$)×日降雨量($\beta=0.29$)	坡度 $\leq 22^\circ$ +坡高 $\leq 30\text{m}$
填海区建设	2.6 倍	填土厚度($\beta=0.58$)×荷载强度($\beta=0.32$)	荷载 $\leq 80\text{kPa}$ +预压期 ≥ 5 年
地下水抽采(岩溶区)	4.1 倍	水位降幅($\beta=0.71$)×抽水速率($\beta=0.22$)	抽水速率 $\leq 1.2\text{m/月}$

示滑坡体以 12m/s 高速运动,裹挟沿途松散物质使体积放大 3.2 倍,冲击范围达 0.6km²。

该事件揭示“工程超载→土体渐进破坏→暴雨触发→灾害规模级联放大”的链式模型,为深圳高风险渣土场管控提供警示。

1.4 人为致灾概率的量化规律与防控启示

基于 127 个灾害案例的多元回归分析,建立深圳特色人为致灾概率模型(表 1)。

2 人为诱发地质灾害的动力学机制研究

2.1 工程扰动的岩土力学响应机制

基于深圳湾超级总部基地、前海填海区等典型案例,本次研究通过 FLAC3D 数值模拟与离心试验揭示人为活动的力学本质^[8]。基于摩尔-库仑强度准则,建立边坡失稳的力学模型,抗剪强度公式:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中, c 为黏聚力(kPa), σ 为法向应力(kPa), φ 为内摩擦角(°)。开挖卸荷导致法向应力 σ 降低,抗剪强度 τ 衰减,当剩余抗剪强度低于下滑力时触发滑坡。通过 FLAC3D 模拟得出,花岗岩残积土边坡的稳定系数:

$$F_s = \frac{cA + (\gamma h \cos \theta - u) \tan \varphi}{\gamma h \sin \theta} \quad (2)$$

其中, γ 为土体容重(kN/m³), h 为坡高(m), θ 为坡角(°), u 为孔隙水压力(kPa)。模拟显示,坡高每增加 5m, F_s 呈指数下降: $F_s = F_{s0} \cdot e^{-0.036h}$ (F_{s0} 为初始稳定系数, h 为开挖深度,拟合优度 $R^2=0.91$)。

2.1.1 边坡失稳机制表现为开挖卸荷引发的连锁反应

当基坑深度超过 15m(如深圳湾项目),坡

脚剪应力集中区扩大至原状土的 1.8 倍;岩土体塑性变形积累导致抗剪强度衰减 32%,这一过程符合“卸荷→应力重分布→剪切破坏”的动力学路径^[9]。模拟表明,花岗岩残积土边坡临界稳定系数随开挖深度呈指数下降:深度每增加 5m,稳定系数降低 0.18。

2.1.2 填海区软土沉降则归因于动-静荷载的耦合效应

前海桂湾片区离心试验显示,交通动荷载(重载车辆反复作用)使软土次固结速率提高 40%;其物理本质是动荷载破坏土颗粒间胶结结构,导致孔隙水排出通道贯通^[10]。工程实践证明,动荷载作用下软土沉降量可达静荷载的 1.4 倍,这解释了填海区道路“屡修屡裂”的根源。

2.2 城市水系统干扰的灾变临界机制

2.2.1 地下水抽采与岩溶塌陷

针对横岗岩溶区塌陷事件^[11],研究建立临界水位降速阈值模型,引入渗透力公式与溶洞顶板极限平衡条件:

$$j = \gamma_w \cdot i = \gamma_w \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (3)$$

式中, γ_w 为水容重(kN/m³), i 为水力梯度, Δh 为水位降深(m), L 为渗流路径长度(m)。当渗透力超过土体颗粒间胶结强度时,引发潜蚀掏空。溶洞顶板安全厚度临界值推导为:

$$H_{\min} = \frac{K \cdot \gamma_s \cdot D}{4[\sigma_t]} \quad (4)$$

其中, K 为安全系数, γ_s 为岩体容重, D 为溶洞直径, σ_t 为岩体抗拉强度。

当抽水速率超过 1.5m/月(如横岗工业园 1.8m/月),潜蚀作用使溶洞顶板安全厚度从 8.7m 骤降至 3.2m;根本原因是水流加速带走充填物,形成空洞连锁坍塌。深圳灰岩区渗透系数

表 2 多源数据的 XGBoost 预测模型表

特征因子	物理意义	深圳典型值范围
坡度	控制重力势能	滑坡高发区: 15°—35°
土地利用强度指数	反映工程扰动程度	CBD 区域: 6.0—8.5
地下水位年变幅	指示水文稳定性	岩溶区: >3.0m
残积土黏聚力	表征岩土抗剪能力	危险阈值: <20kPa

较低 (10^{-5} cm/s), 更易达到临界状态——抽水速率超阈值 20% 时, 塌陷概率达 91%。

2.2.2 管网渗流-土体液化耦合效应

基于 Seed 简化法, 建立液化势指数 (LPI) 计算模型:

$$LPI = \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_1 - N_{cr}}{N_{1max} - N_{cr}} \right) \cdot \Delta z_i \quad (5)$$

式中, N_1 为实测标准贯入击数, N_{cr} 为临界击数, Δz_i 为土层厚度 (m)。

龙华沉降区案例揭示地下基础设施老化的次生风险, 暴雨期地下管网泄漏量达 2.5 万 m^3/d , 使浅层粉细砂 (相对密度 45%) 地下水位抬升至地表下 1m; 土体含水近饱和 (>95%) 状态下, 地震易发性指数 LPI (液化势指数) 从 1.2 剧增至 7.8 (临界值 5.0), 意味着中等地震 (VII 度) 即可引发大规模液化。该机制凸显城市地下空间开发的隐蔽风险。

2.3 多因素耦合致灾的动力学模型

2.3.1 “地质-工程-暴雨”三联致灾模型

基于光明滑坡灾害链, 量化多因子耦合效应, 定义耦合放大系数 k , 量化工程超载 (τ_e) 与暴雨入渗 (τ_r) 的协同效应:

$$\tau_{total} = k \cdot (\tau_e + \tau_r) \quad (6)$$

$$k = 1 + \alpha \cdot \frac{\Delta c}{c_0} \quad (7)$$

式中, α 为耦合系数, Δc 为暴雨导致的黏聚力降幅, c_0 为初始黏聚力。光明滑坡案例中, $\Delta c = 15\text{kPa}$, $k = 1.7$, 使总剪应力远超临界值:

$$\tau_{total} = 1.7 \times (85 + 62) = 250\text{kPa} > \tau_f = 180\text{kPa} \quad (8)$$

式中, τ_f 为土体抗剪强度极限。工程超载 (渣土堆高 100m) 使边坡剪应力比 (τ/τ_f) 达 1.67, 远超临界值 1.25; 暴雨入渗 (台风日降雨

342mm) 使土体含水率 12 小时内从 18% 飙升至 37%, 孔隙水压力激增; 耦合放大效应: 数值模拟显示, 二者协同作用使失稳体积扩大 3.2 倍, 远超单一因素影响。通过深圳 127 个边坡案例反演, 工程超载因子权重 (73%) 与暴雨因子 (58%) 显著高于静荷载 (21%), 证实人为扰动是灾害链的“第一张多米诺骨牌”。

2.3.2 机器学习赋能的动态风险评估

XGBoost 模型引入物理约束项, 构建动态风险函数:

$$P(\text{disaster}) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 U + \beta_3 \Delta h + \beta_4 c)}} \quad (9)$$

式中, S 为坡度 ($^\circ$), U 为土地利用强度指数, Δh 为地下水位变幅 (m), c 为残积土黏聚力 (kPa)。通过深圳 127 个样本训练, 特征权重为: $\beta_1 = 0.45$ (坡度) $> \beta_2 = 0.32$ (工程扰动) $> \beta_3 = 0.18$ (水文) $> \beta_4 = 0.05$ (岩土强度), 印证人为活动主导性。集成多源数据构建 XGBoost 预测模型 (表 2)。

该模型对 2010-2020 年灾害数据训练准确率达 93.5%, 成功预警 2023 年大鹏新区滑坡 (预测概率 89.7%, 实际发生时间误差 < 48 小时)。该模型突破传统方法局限, 实现灾害链的跨尺度动态推演。

3 深圳地质灾害智慧防控体系构建

3.1 基于动力学模型的防控阈值转化

将上述案例导出的临界值嵌入空间规划与工程设计, 形成可量化的防控标准。

3.1.1 边坡工程安全阈值

依据公式 (9), 结合深圳花岗岩残积土特性

($c=25\text{kPa}, \varphi=28^\circ$), 反算坡高-坡度联合限值为 $h \leq 30\text{m}$ 且 $\theta \leq 22^\circ$ (对应 $F_s = 1.3$)。前海深港合作区应用该阈值后, 基坑边坡失稳风险降低 62%。

3.1.2 岩溶区抽水控制

基于公式(4), 结合深圳灰岩区 [σ_t] = 1.2MPa, 推导抽水速率阈值为 1.2m/月。2024 年横岗片区实施该标准后, 岩溶塌陷发生率同比下降 78%。

3.1.3 管网渗流安全线

通过液化势指数(LPI)模型, 设定 $LPI=5.0$ 为临界值。龙华区管网改造后, LPI 从 7.8 降至 3.5, 消除中等地震下的液化风险。

3.2 灾害链防控的系统动力学理论

构建“监测-建模-调控”闭环反馈机制, 实现多灾种协同防控。

3.2.1 前馈控制

利用 InSAR 监测技术, 结合 FLAC3D 模型反演应力场, 提前 6-12 个月预警潜在滑坡风险。光明科学城应用该技术后, 预警准确率达 92%。建立暴雨-滑坡耦合预警模型, 通过实时雨量数据 ($I_{10\text{min}} > 50\text{mm}$) 触发自动响应, 2024 年成功拦截 3 起因短时强降雨引发的滑坡险情。

3.2.2 实时控制

北斗位移监测数据接入 XGBoost 模型, 当 $P(\text{disaster}) > 0.8$ 时, 自动启动“工程停工-人员疏散”指令。深圳湾超级总部基地试点期间, 响应时间从 30 分钟缩至 5 分钟。开发管网泄漏-土体液化联动预警系统, 集成光纤传感与孔隙水压力监测, 实现泄漏点定位精度 $< 5\text{m}$, 预警延迟 < 2 分钟。

3.2.3 反馈优化

灾后利用 FLOW-3D 模拟灾害链演化, 修正防控阈值。2023 年新桥街道地面塌陷事件后, 将岩溶区建筑荷载限值从 200kPa 下调至 150kPa, 后续同类灾害零发生。构建“数据-模型-政策”迭代机制, 每季度更新防控标准。2024 年修订《深圳市地质灾害防治规划》时, 纳入 17 项基于模型优化的工程设计规范所需的

参数。

3.3 智慧防控平台的技术突破

该平台集成多物理场耦合模块与人工智能技术, 实现全流程智能化。

3.3.1 BIM+GIS 融合分析

将基坑支护结构(BIM 模型)与残积土层分布(GIS 数据)叠加, 动态计算总剪应力 τ_{total} 与稳定系数 F_s 。前海妈湾片区应用中, 模型预测精度达 90%, 较传统方法提升 30%。开发三维可视化决策系统, 实时显示灾害风险热力图。2024 年台风“鹦鹉”期间, 通过该系统提前转移 1.2 万人, 避免经济损失超 5 亿元。

3.3.2 边缘计算与智能终端

在高风险区部署微型计算单元, 就地处理传感器数据(如土体含水率、孔隙水压力), 预警延迟从 30 分钟压缩至 5 分钟。石岩水库周边试点区域, 2024 年成功拦截 2 起因渗流引发的管涌事件。研发便携式智能监测设备, 集成激光雷达与 AI 识别算法, 可自动识别边坡裂缝并估算扩展速率。深圳北站枢纽应用后, 巡查效率提升 80%。

3.3.3 数字孪生与模拟推演

构建城市级地质灾害数字孪生体, 模拟不同防控方案的效果。对比“坡角削至 20° ”与“增设锚杆支护”的 F_s 提升幅度 (0.28 vs 0.35), 辅助选择最优方案。开发灾害链虚拟演练平台, 支持多部门协同处置。2024 年深圳湾海底隧道涌水应急演练中, 通过数字孪生模拟优化疏散路线, 响应时间缩短 40%。

3.4 学术价值与区域治理延伸

首次将岩土力学公式(如摩尔-库仑准则)与机器学习模型(XGBoost)耦合, 构建“物理机制驱动-数据智能验证”的混合建模框架, 突破传统单一模型的局限性。该方法在深圳 127 个样本测试中, 预测准确率达 93.4%, AUC 值 0.95。提出“人为扰动强度指数”(HDI), 整合工程规模、水文干预等多维度指标 ($HDI = 0.6U + 0.3Q + 0.1L$), 建立城市化与灾害风险的关联和

定量映射。

研发多模态数据融合技术,通过时空注意力机制分离环境噪声,结合知识图谱实现 InSAR、GNSS 等数据的标准化表达。深圳智慧应急平台应用后,数据处理效率提升 50%。构建地质灾害预测训练大模型(GeoGPT),通过迁移学习降低区域适配成本。在珠江口软土区试点中,模型训练时间从 3 个月缩至 1 周,预测准确率保持 86%以上。

4 结论

本文系统揭示了深圳城市化进程中人为活动诱发地质灾害的动力学机制,构建了智慧防控体系并验证其有效性。通过多源数据融合与物理-智能耦合建模,发现工程开挖、地下水抽采等四类人为活动通过改变岩土应力状态(如抗剪强度衰减 32%)、水文环境(如渗透力超临界值 20%)及地表荷载(如附加应力超载 23%),显著提升灾害风险(耦合效应使风险放大 1.7~4.1 倍)。建立的“地质-工程-暴雨”三联致灾模型与 XGBoost 动态风险评估模型(预测准确率 93.5%),量化了人为扰动与灾害链的非线性关系。研究成果不仅为超大城市破解“高密度开发-地质安全”矛盾提供了“深圳模式”,其混合建模方法与协同治理框架更具区域普适性,可为粤港澳大湾区及同类城市化地区提供理论支撑与技术参考。未来研究可进一步拓展多灾种链式反应的跨尺度模拟,深化人工智能与地质安全的融合应用。

参考文献(References):

[1] 王艳,邓英尔,高延超.基于数据驱动模型的深圳填海区地面沉降预测分析[J].地质灾害与环境保护,2024,35(03):26-31.

护,2024,35(03):26-31.

- [2] 凡玲龙.深圳福田区地质灾害发育及分布特征研究[J].地下水,2023,45(03):203-204.
- [3] 袁菲菲,许水林,冀应斌.地质灾害防护与治理[J].河南科技,2021,40(01):150-152.
- [4] 杨迁,王雁林,马园园.2001~2019年中国地质灾害分布规律及引发因素分析[J].地质灾害与环境保护,2020,31(04):43-48.
- [5] 李燕.地质灾害工程中边坡稳定性及滑坡治理措施[J].城市建筑,2020,17(24):167-168.
- [6] 吴博.深圳市地质灾害监测预警方法研究[D].吉林大学,2024.
- [7] 幸新涪.基于 InSAR 技术的隐患边坡识别及降雨滑坡模型修正方法[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2024.
- [8] 李道震,张越,赖志华,等.基于三维 WebGIS 的边坡地质灾害监测信息系统设计与实现[J].测绘与空间地理信息,2022,45(02):55-57.
- [9] 许丹丹,蒋方媛,景兴达,等.深圳市南山区填海区地面沉降分区及评价[J].地质灾害与环境保护,2021,32(03):25-32.
- [10] 张洪岩.深圳市罗湖建成区地质灾害特征及防治对策[J].绿色科技,2021,23(12):182-186.
- [11] 王艳,邓英尔,高延超.基于数据驱动模型的深圳填海区地面沉降预测分析[J].地质灾害与环境保护,2024,35(03):26-31.

作者简介:

第一作者:汤天赐,1992年生,男,河南淮滨人,华南防灾减灾研究院(深圳)有限公司,工程师,主要研究方向为地质勘查工程(地质灾害防治、地质环境评价)。Email:taw0746@163.com

Geological Risk Assessment and Prevention of Mineral Resource Development based on Geotechnical Investigation

TANG Tianci

(South China Institute of Disaster Prevention and Reduction (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518052, China)

Abstract: This paper takes geological disasters in Shenzhen as the research object, reveals the mechanism of geological disasters induced by human activities in urbanization, and constructs a prevention and control system. Through methods such as remote sensing monitoring, numerical simulation and machine learning, it is clarified that four types of activities, including engineering excavation, groundwater extraction, reclamation and superimposed engineering loads, cause disasters by changing geotechnical stress and the hydrological environment. A “geology–engineering–extreme precipitation” coupling model is constructed, which confirms that human intervention amplifies the disaster risk by 2.6–4.1 times, and a disaster probability model with an accuracy of 93.5% is established. The “intelligent monitoring–resilient planning–collaborative governance” system is proposed: delimiting the safety bottom line such as slope height $\leq 30\text{m}$, deploying InSAR+Beidou monitoring, and applying digital twin technology; innovating the “Urban Geological Digital Twin Brain” platform to dynamically evaluate 54,000 risk points. The results provide a “analysis–prediction–prevention and control” paradigm for super–large cities, and provide a reference for urban geological safety management.

Key words: human–induced geological disasters; urbanization; prevention and control system; engineering disturbance; disaster chain model; intelligent prevention and control